【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

单肢转双肢薄壁高墩桥梁的抗震性能

卢 尧¹, 鞠秀颖², 杨 明¹, 常 山¹, 袁鹏飞¹, 田林杰¹

1) 东南大学交通学院, 江苏南京 210096; 2) 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011

摘 要: 为研究不同桩土模型对单肢转双肢薄壁高墩的地震响应差异, 以及单肢转双肢薄壁高墩与双肢薄壁高墩地震响应的不同, 以一座采用单肢转双肢薄壁高墩的大跨径桥梁为例, 采用有限元软件 Midas Civil 建立三维动力分析模型, 分析了直接嵌固、等效嵌固和六弹簧法 3 种桩土效应对桥墩抗震性能的影响。结果表明: 对单肢转双肢高墩桥梁进行地震响应分析时, 忽略桩土效应的计算结果并不总是偏于安全的, 采用等效嵌固法模型的计算结果则是偏于安全的。三向地震作用下, 单肢转双肢高墩的墩顶顺桥向极限位移值小于传统的双肢薄壁高墩的墩顶位移。

关键词: 桥涵工程; 大跨径桥梁; 单肢转双肢; 桩-土相互作用; 薄壁高墩; 地震响应

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.02151

Seismic performance of single-limb to double-limb thin-walled high pier bridge

LU Yao¹, JU Xiuying², YANG Ming¹, CHANG Shan¹,
YUAN Pengfei¹, and TIAN Linjie¹

1) School of transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, P. R. China

2) China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, P. R. China

Abstract: In order to study the seismic response differences of different pile-soil models to the thin-walled bridge pier of single-limb to double-limb, the dynamic models are established by using the Midas Civil software. The effects on the seismic performance of this type of pier are analyzed by using three different kinds of pile-soil interaction of direct embedded model, equivalent embedded model and six-spring model. The double-limb thin-walled high pier model is also established for comparing the seismic response differences between the thin-walled bridge pier of single-limb to double-limb and the double-limb thin-walled high pier. The results show that when analyzing the seismic response of the thin-walled bridge pier of single-limb to double-limb, the calculated results by neglecting the pile-soil interaction are not always safe, but the results calculated by the equivalent embedded model are always safe. Under the action of three-way earthquake, the maximum displacement of pier top in the thin-wall high pier of single limb to double-limb is significantly less than that in the double-limb thin-walled high pier bridge.

Key words: bridge engineering; long-span bridge; single-limb to double-limb; pile-soil interaction; thin-walled high pier; seismic responses

Received: 2019-04-02; Accepted: 2019-09-28

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51078078)

Corresponding author: Associate professor YANG Ming. E-mail: barty_ym@sina.com

Citation: LU Yao, JU Xiuying, YANG Ming, et al. Seismic performance of single-limb to double-limb thin-walled high pier bridge [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(2): 151-157. (in Chinese)

中国幅员辽阔,地势复杂多样,处于亚欧板块与环太平洋板块之间,是世界上地震多发以及强震频发的国家之一^[1].地震对桥梁的危害巨大,典型的破坏形态有落梁、支座以及桥墩破坏等^[2],历次重大地震灾害中桥梁结构的严重破坏均警示人们应对桥梁结构的抗震安全性提出更高要求.近年来中国高墩桥梁的数量越来越多,抗震设计规范中的桥墩抗震仅适用于规则桥梁,而高墩桥梁往往都是不规则的^[3-4],常规抗震设计不再适用于高墩桥梁^[5].因此,有必要对高墩桥梁的抗震性能加以研究.

中国在公路钢筋混凝土桥墩的抗震研究中取得了一些成果.许党党^[6]通过对结构连续空心板桥墩柱的抗震研究,建议当墩柱高度大于 6 m 时,采用延性设计准则.崔海琴等^[7]通过拟静力实验研究了矩形薄壁墩的抗震性能,表明薄壁墩的破坏为弯曲破坏.孙治国^[8]总结了国内主要桥梁工程中钢筋混凝土空心桥墩的应用情况,结合国内外规范对比分析了薄壁墩的抗剪能力,发现中国《公路桥梁抗震设计细则》更适用于薄壁空心墩的抗剪强度分析.梁新玲^[9]研究了桩土效应对波纹钢腹板桥梁抗震性能的影响,发现考虑桩土效应后地震响应更小.陈伯银^[10]研究了 Pushover 分析方法的改进及其在高墩大跨桥梁抗震评估中的适用性,发现矩形薄壁空心墩比圆形和正方形薄壁空心墩具有更好的抗震性能.陈嵘^[11]提出刚性盖梁双柱墩容许位移简化计算方法,通过算例证明了简化方法的适用性.彭容新^[12]研究了双肢薄壁高墩在地震作用下的破坏形态和力学性能,采用低周反复荷载试验探讨了不同轴压比、主筋率及体积配箍率对该类型桥墩抗震性能的影响.王刚等^[13]提出利用抗震设计规范中给出的设计反应谱,可方便地计算各振型地震反应的最大值.王腾等^[14]建立了考虑桩土相互作用的群桩体系模型,探讨了软土地基-群桩体系的相互作用.以上研究仅对普通钢筋混凝土的抗震性能作了分析,但针对单肢转双肢薄壁高墩桥梁抗震性能的相关研究尚未见报道.本研究以某公路高墩桥梁为例,采用有限元软件 Midas Civil 建立了一座单肢转双肢薄壁高墩的连续刚构桥模型,通过施加 Elcentro270 地震波进行了罕遇地震下的三向非线性地震响应分析,研究了不同桩土效应的模型对单肢转双肢薄壁高墩地震响应的差异.另外,还建立了一座双肢高墩刚构桥模型,用等效嵌固的桩土效应对比研究了双肢薄壁高墩与单肢转双肢薄壁高墩的地震响应的差异.

<http://journal.szu.edu.cn>

1 工程概况

某高速公路大桥为预应力混凝土连续刚构桥.该桥跨径组合为 $(87 + 160 + 87)$ m (图 1),采用单箱单室箱形截面.箱梁根部高 9.80 m,跨中梁高 3.80 m,其间梁高按 2 次抛物线变化.箱梁顶板宽 16.50 m,底板宽 8.50 m,腹板厚跨中段为 0.65 m、根部段为 0.80 m.桥墩顶部范围内箱梁顶板厚 0.80 m,底板厚 1.30 m,腹板厚 0.80 m.主梁采用纵、横、竖三向预应力体系.

图 1 单肢转双肢薄壁高墩桥型布置 (单位: cm)

Fig. 1 Single-limbed to double-limbed thin-walled high pier bridge (unit: cm)

主墩均为单肢转双肢薄壁高墩,两桥墩高度分别为 95 m 和 105 m.桥墩横桥向宽 8.5 m,顺桥向双肢单薄壁长为 2.2 m;顺桥向单肢采用单箱单室截面,顺桥向长为 8.0 m.主桥桥墩基础采用直径 2.5 m 的桩基础.桩身及桥墩立面图分别见图 2 和图 3.

2 不同桩土效应模型的地震响应

2.1 桩土效应模型

本研究采用直接嵌固模型、等效嵌固法模型和六弹簧法模型,研究了不同桩土模型对单肢转双肢薄壁高墩的地震响应差异.采用直接嵌固模型时,直接忽略桩土效应的影响,在桥墩底部进行固结.等效嵌固模型的嵌固深度可根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD 63—2007)计算得到.六弹簧模型将桩基的作用等效为墩底弹簧,利用 6 个方向不同的刚度来模拟桩土效应,依据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD 63—2007)相关规定,计得弹簧各个方向的刚度.限于篇幅,只选择右主

图2 桩身立面图 (单位: cm)

Fig. 2 Pile elevation (unit: cm)

图3 桥墩立面图 (单位: cm)

Fig. 3 Bridge pier elevation (unit: cm)

墩的墩顶、墩底和单肢转双肢处3个截面进行对比研究,截面示意图如图4.

2.2 桩土效应模型计算参数

建立等效嵌固模型的关键在于嵌固深度 H 的取值. 在公路桥梁桩计算中,一般根据水平刚度等效原则来确定嵌固深度,

$$H = \sqrt[3]{\frac{12EI}{\rho_2}} - l_0 \quad (1)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{\alpha^3 EI} \times \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (2)$$

图4 截面示意图

Fig. 4 (Color online) Control section diagram

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{EI}} \quad (3)$$

其中, EI 为单桩的抗弯刚度; ρ_2 为单桩的水平抗推刚度; α 为变形系数; h 为基础入土深度; m 为地基土的比例系数; l_0 为基础计算宽度; A_i 、 B_i 、 C_i 和 D_i ($i = 1, 2, 3, 4$)为计算水平抗推刚度的系数,根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD 63—2007)查用. 经计算,左墩桩的嵌固深度 $H = 7.26$ m,右墩桩的嵌固深度 $H = 7.30$ m. 对于六弹簧模型,关键在于承台底部弹簧刚度的确定,本研究不考虑承台前侧作用土的弹性抗力,近似地把承台底面视为地面,由此计算各桩基基础刚度.

首先计算出弹性单排桩的各柔度系数 $\delta_{HH}^{(0)}$ 、 $\delta_{HM}^{(0)}$ 、 $\delta_{MH}^{(0)}$ 和 $\delta_{MM}^{(0)}$,然后计算弹性多排桩各单桩柔度系数 $\delta_{HH}^{(0)}$ 、 $\delta_{HM}^{(0)}$ 、 $\delta_{MH}^{(0)}$ 和 $\delta_{MM}^{(0)}$,接着计算弹性多排桩各单桩的刚度系数 ρ_{PP} 、 ρ_{HH} 和 ρ_{MM} ,最后计算弹性多排桩桩基的整体刚度 γ_{cc} 、 γ_{aa} 和 $\gamma_{\beta\beta}$. Midas Civil中的弹簧刚度 SD_x 为 x 方向的水平刚度, SD_y 为 y 方向的水平刚度, SD_z 为 z 方向的竖向刚度, SR_x 为 x 方向的转角刚度, SR_y 为 y 方向的转角刚度, SR_z 为桩基基础总的竖向转角刚度. 本研究按照上述方法计算得到六弹簧模型承台底部弹簧单元刚度(表1).

表 1 六弹簧模型承台底部弹簧刚度

Table 1 Spring stiffness of the bottom of bearing platform of six spring models

桥墩	$SD_x/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$SD_y/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$SD_z/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$SR_x/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$SR_y/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$SR_z/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
左墩	38 140 632	38 140 632	15 963 376	375 268 155	375 268 155	80 166 759
右墩	38 140 632	38 140 632	15 963 376	375 268 155	375 268 155	80 166 759

2.3 动力特性对比分析

借助有限元软件 Midas Civil, 采用 Lanczos 法对直接嵌固模型、等效嵌固模型和六弹簧法模型进行动力特性分析, 取 3 种模型的前 10 阶自振频率进行对比, 结果见表 2. 由表 2 可知, 3 种桩土效应模型前 10 阶的自振频率相差很小, 且随着模态阶数的增多, 自振频率的差值增大. 前 3 阶的振型特征分别为全桥纵弯、全桥横弯和桥墩纵弯.

表 2 各模型前 10 阶自振频率

Table 2 The first 10 dynamic characteristics of each model

阶数	自振频率/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	直接嵌固模型	等效嵌固模型	六弹簧法模型
1	1.05	1.11	1.01
2	1.72	1.72	1.47
3	2.87	2.88	2.86
4	3.74	3.74	3.73
5	4.29	4.26	3.98
6	6.78	6.78	6.73
7	9.54	9.16	7.13
8	10.51	9.58	8.40
9	12.09	10.27	8.45
10	12.10	11.59	10.01

2.4 地震动输入

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015), 该桥所处场地类型为 II 类, 所在地区地震烈度为 VIII 度; 地震动峰值加速度为 $0.20g$. 根据《公路桥梁抗震设计细则》规定, 本研究取阻尼比为 0.05. 该桥主跨为 160 m, 属于抗震设防为 A 类桥梁.

根据《公路桥梁抗震设计细则》, 水平向设计加速度反应谱谱值 S 为

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45), & T < 0.1 \text{ s} \\ S_{\max}, & 0.1 \text{ s} \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T), & T > T_g \end{cases} \quad (4)$$

其中, T 为自振周期; T_g 为设计反应谱特征周期; $S_{\max}$ 为反应谱最大值. 设 C_1 为抗震重要性系数, C_s 为场地系数, C_d 为阻尼调整系数, A 为水平向设计基本地震动加速度峰值. 在 E1 地震作用下 $T_g = 0.45 \text{ s}$, $C_1 = 1$, $C_s = 1$, $C_d = 1$, $A = 0.2g$, $S_{\max} = 0.45g$; 在 E2 地震作用下 $T_g = 0.45 \text{ s}$, $C_1 = 1.7$, $C_s = 1$, $C_d = 1$, $A = 0.2g$, $S_{\max} = 0.765g$.

本桥为大跨度桥梁结构, 按规范要求应考虑竖向地震动的作用. 该桥竖向设计加速度反应谱由水平向设计地震动加速度反应谱乘以水平向谱比函数 R . 在基岩场地:

$$R = 0.65 \quad (5)$$

在土层场地:

$$R = \begin{cases} 1.0, & T < 0.1 \text{ s} \\ 1.0 - 2.5(T - 0.1), & 0.1 \text{ s} \leq T \leq 0.3 \text{ s} \\ 0.5T, & T > 0.3 \text{ s} \end{cases} \quad (6)$$

2.5 时程分析地震波的选取

时程分析结果的精确性依赖于地震动输入, 如果地震动输入选择的不好, 可能导致结果偏小. 本研究选择的是典型罕遇地震 Elcentro270 地震波. 它的地震动时程如图 5, 放大系数取 0.99, 分析时间为 50 s.

图 5 Elcentro270 地震动时程图

Fig. 5 (Color online) Elcentro270 ground motion

2.6 桥墩内力

在三向地震作用下,本研究将恒载轴力、动载轴力、 y 方向及 z 方向的弯矩和剪力进行对比,结果见表3。由表3可知,在三向地震作用组合下,等效嵌固模型除了墩顶轴力小于直接嵌固模型和六弹簧法模型,其余各截面内力均大于直接嵌固模型。六弹簧法除了双肢底和墩底弯矩小于直接嵌固模型,其余各截面内力值均大于直接嵌固模型。对墩底弯矩而言,六弹簧法的墩底弯矩为692 773.6

$\text{kN}\cdot\text{m}$,明显小于直接嵌固法和等效嵌固法,差值接近50%。等效嵌固法的墩底弯矩为1 389 291.9 $\text{kN}\cdot\text{m}$,比直接嵌固法大3.38%。墩顶截面剪力、双肢底截面轴力及剪力、墩底轴力及剪力均按照直接嵌固法、等效嵌固法和六弹簧法逐渐增大。

直接嵌固模型墩各截面的轴力与剪力均略小于等效嵌固模型和六弹簧法模型。这表明,对单肢转双肢连续刚构桥进行地震响应分析时,忽略桩土效应的直接嵌固模型的计算结果并不总是偏于安全。

表3 各模型桥墩的控制截面内力
Table 3 Internal force for control sections of model piers

模型	1 截面			2 截面			3 截面		
	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
直接嵌固	427 641.7	8 796.9	200 536.4	77 958.5	9 980.8	421 908.7	448 912.2	29 531.3	1 343 813.0
等效嵌固	317 046.1	10 150.5	188 900.9	117 506.8	11 135.9	459 017.1	466 861.9	34 621.5	1 389 291.9
六弹簧法	456 689.8	8 807.2	218 087.2	96 758.8	10 115.2	311 174.9	456 689.8	31 894.3	692 773.6

2.7 墩顶位移

对桥墩位移地震响应的分析主要考虑其墩顶位移,故通过关键截面的顺桥向和横桥向极限位移值,来比较各模型在三向地震作用下变形的差异,具体数值见表4。由表4可知,在三向地震作用下,桩土效应对墩顶位移的影响是存在的。等效嵌固模型的墩顶顺桥向位移为0.243 m,大于直接嵌固法的0.240 m和六弹簧法的0.227 m。等效嵌固模型的墩顶横桥向位移为0.254 m,大于直接嵌固法的0.243 m和六弹簧法的0.200 m。发现不管是顺桥向还是横桥向,墩顶位移值按从小到大的排序都为六弹簧法模型、直接嵌固模型和等效嵌固法模型。其中,等效嵌固法模型与直接嵌固法模型的位移最大差距为4.6%,相差不大。

表4 各模型墩顶位移比较表
Table 4 Comparison of displacement of pier tops of each model m

模型	顺桥向位移	横桥向位移
直接嵌固	0.240	0.243
等效嵌固	0.243	0.254
六弹簧法	0.227	0.200

3 地震响应对比分析

为深入探讨单肢转双肢薄壁高墩地震响应的特

性,建立了一座双肢薄壁高墩桥梁进行对比。双肢薄壁高墩桥梁的有限元模型如图6。在相同工况作用下,提取出单肢转双肢薄壁高墩和双肢薄壁高墩墩顶、墩底各截面的内力和位移值进行比较分析。

图6 双肢薄壁高墩桥梁计算模型
Fig. 6 (Color online) Calculation model for bridges with thin-walled high piers

3.1 内力对比

单肢转双肢薄壁高墩和双肢薄壁高墩两种模型的控制截面内力对比见表5。由表5可知,双肢薄壁高墩模型的墩顶截面内力较单肢转双肢高墩模型的计算值轴力大6.8%,剪力大10.9%,弯矩大9.7%。但是双肢薄壁高墩模型的墩底内力值明显小于单肢转双肢高墩模型的内力值,这是由于双肢模型的墩底混凝土截面面积小、刚度小,从而分配的内力也小造成的。

表 5 两模型控制截面内力对比

Table 5 Internal force comparison of the control sections of two models

模型	1 截面			3 截面		
	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
单肢转双肢	317 046	10 151	188 901	466 862	34 622	1 389 292
双肢	295 524	9 041	209 086	79 981	12 906	654 423

3.2 墩顶位移对比

提取墩顶顺桥向和横桥向的位移进行对比, 墩顶顺桥向位移单肢转双肢模型为 0.056 m, 双肢模型为 0.125 m; 墩顶横桥向位移单肢转双肢模型为 0.070 m, 双肢模型为 0.074 m.

双肢转薄壁高墩桥梁的墩顶横桥向位移与双肢高墩桥梁的墩顶位移时程变化趋势一致, 数值上也相差不多. 两者墩顶顺桥向位移的动态时程对比见图 7. 由图 7 可知, 在顺桥向墩顶位移上, 双肢转薄壁的墩顶顺桥向位移时程变化趋势虽然基本上一致, 但是极限位移值为 5.59 cm, 明显小于双肢高墩墩顶顺桥向位移的 12.49 cm, 相差 55.2%.

图 7 两模型右墩墩顶顺桥向位移动态时程
Fig. 7 (Color online) Dynamic time history of top displacement of right pier along bridge direction of two models

结 语

以某高速公路上的一座单肢转双肢高墩桥梁为研究对象, 用有限元软件 Midas Civil 建立了直接嵌固、等效嵌固和六弹簧的桩土效应模型进行地震响应分析. 对单肢转双肢薄壁高墩连续刚构桥, 忽略

桩土效应时, 计算结果并不是总偏于安全的. 在对单肢转双肢高墩桥梁进行地震响应分析时, 采用等效嵌固法模型考虑桩土效应的计算结果是偏于安全的. 三向地震作用下, 单肢转双肢高墩墩顶的顺桥向极限位移值小于传统的双肢薄壁高墩的墩顶位移, 抗震性能更好.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51078078)

作者简介: 卢 皓 (1994—), 东南大学硕士研究生. 研究方向: 桥梁组合结构. E-mail: 1114523008@qq.com

引 文: 卢 皓, 鞠秀颖, 杨 明, 等. 单肢转双肢薄壁高墩桥梁的抗震性能[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(2): 151-157.

参考文献 / References:

- [1] 蔡报坤. 虑土-结构相互作用下应用功能分离型支座的高铁桥梁抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
CAI Baokun. Study on seismic performance of high-speed railway bridge with functional separation bearing considering soil-structure interaction [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [2] 朱文正. 多跨简支梁桥加固措施的抗震性能评估[J]. 深圳大学学报理工版, 2015, 32(2): 152-161.
ZHU Wenzheng. Seismic performance evaluation of retrofit measures for multi-span simple-supported bridges [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(3): 152-161. (in Chinese)
- [3] 卢 皓, 李建中. 强震作用下高墩桥梁抗震性能特点分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 858-865.
LU Hao, LI Jianzhong. Analysis of seismic performance characteristics of bridge with high piers under strong earthquake motion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 858-865. (in Chinese)
- [4] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S].
JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. (in Chinese)
- [5] 宗周红, 夏 坚, 徐绰然. 桥梁高墩抗震研究现状及展望[J]. 东南大学学报自然科学版, 2013, 43(2): 445-452.
ZONG Zhouhong, XIA Jian, XU Chuoran. Seismic study

- of high piers of large-span bridges: an overview and research development [J]. *Journal of Southeast University Natural Science*, 2013, 43(2): 445-452. (in Chinese)
- [6] 许党党. 结构连续空心板桥墩柱抗震计算分析[J]. *北方交通*, 2013, (4): 51-54.
- XU Dangdang. Antiseismic calculation analysis on structure of continuous hollow slab bridge pier stud [J]. *Northern Communications*, 2013, (4): 51-54. (in Chinese)
- [7] 崔海琴, 贺拴海, 宋一凡. 空心矩形薄壁墩延性抗震性能试验[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(6): 58-63.
- CUI Haiqin, HE Shuanghai, SONG Yifan. Experimental study on antiseismic ductility of hollow rectangular thin-walled pier [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(6): 58-63. (in Chinese)
- [8] 孙治国. 钢筋混凝土桥墩抗震变形能力研究[J]. *国际地震动*, 2013(6): 44-45.
- SUN Zhiguo. Research on the seismic deformation capacity of RC bridge columns [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2013(6): 44-45. (in Chinese)
- [9] 梁新玲. 考虑桩土效应的波纹钢腹板连续刚构桥的地震响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LIANG Xinling. Research on seismic response of continuous rigid frame bridge with corrugated steel webs considering soil-pile interaction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [10] 陈伯银. 山区桥梁高墩抗震性能评估方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- CHEN Boyin. Study on evaluation method of seismic performance of bridge high piers in mountain area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [11] 陈 嵘. 水平和竖向地震耦合作用下混凝土梁桥桥墩抗震性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- CHEN Rong. Experimental investigations of the seismic behavior of RC bridge piers under vertical and horizontal seismic coupling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [12] 彭容新. 钢筋混凝土双肢薄壁高墩力学性能试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- PENG Rongxin. Experimental study on mechanical properties of reinforced concrete double-limb thin-walled high piers [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 王 刚, 周晓青. 过滤白噪声地震动模型的CQC振型相关系数计算[J]. *深圳大学学报理工版*, 2018, 35(2): 128-131.
- WANG Gang, ZHOU Xiaoqing. Calculation of CQC mode correlation coefficients under filtered white noise model of earthquake ground motion [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2018, 35(2): 128-131. (in Chinese)
- [14] 王 腾, 席爱斌, 崔春义, 等. 堆煤软土地场中群桩体系工作性能的数值分析[J]. *深圳大学学报理工版*, 2019, 36(1): 67-73.
- WANG Teng, XI Aibin, CUI Chunyi, et al. Numerical analysis of working performance of pile group embedded in soft soil subjected to coal loading [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2019, 36(1): 67-73. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】